第40卷 第6期
2023年6月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 6
Jun. 2023

阿拉善高原土地砾化特征及监测指标

温文杰[1,2]，裴 浩[1,3]，巴 根[1,4]，吴拥军[1,5]，刘智明[1,6]

（1. 内蒙古荒漠生态气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 内蒙古生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；3. 内蒙古气象局，内蒙古 呼和浩特 010051；4. 阿拉善盟气象局，内蒙古 阿拉善盟 750306；5. 东乌珠穆沁旗气象局，内蒙古 锡林郭勒 026300；6. 四子王旗气象局，内蒙古 乌兰察布 011899）

摘 要：探究阿拉善高原土地砾化地区的地表砾石覆盖度（G_c），单位面积地表砾石质量（G_m），0~5 cm、5~10 cm土层深度的砾石质量含量[G_{mc}(0~5 cm)、G_{mc}(5~10 cm)]特征及其相关关系，为其砾化土地的监测与评估奠定指标基础。野外采集阿拉善高原土地砾化地区的砾石样品，测定其G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)。通过单因素方差分析、邓肯多重比较、一元线性回归和相关性分析，探究阿拉善高原的土地砾化特征。结果表明：(1) 阿拉善高原各样地总的G_c(G_m)的平均值为39.49%(3544.04 g·m^{-2})。(2) 粒径为4~8 mm和8~16 mm的G_c(G_m)要显著高于其他粒径的G_c(G_m)(P<0.05)，且粒径为4~8 mm的G_c(G_m)变异系数最小，最为稳定。(3) 阿拉善高原各样地在空间分布格局上呈现出G_c和G_m由东向西、由南向北逐渐增大的分布规律。(4) 不同粒径（总）的G_m和G_c均呈极显著的一元线性回归关系(P<0.01)，G_m也可以很好的评价土地砾化程度。并根据G_c的砾化程度分级阈值确定了相应的G_m的砾化程度分级阈值。(5) 除2~4 mm和>32 mm的粒径外，其他粒径的G_c、G_m与0~5 cm土层内G_{mc}的相关性要明显大于与5~10 cm土层内G_{mc}的相关性，总的G_c、G_m与0~5 cm土层内G_{mc}的相关性要明显大于与5~10 cm土层内G_{mc}的相关性。(6) 确定了砾化土地类型之一的戈壁地表砾石覆盖度阈值为25%。研究结果可为阿拉善高原和其他区域砾化土地的监测和评估奠定指标基础。

关键词：土地砾化；砾石覆盖度；单位面积地表砾石质量；砾石质量含量；阿拉善高原

土壤中粒径>2 mm的矿物颗粒，被称为砾石[1-3]。砾石在土壤表层有3种存在形态，一种是分布于土壤表面，一种是部分嵌入土壤，一种是完全埋藏于土壤中。土地砾化是土地表层砾石的比例或量增加的过程，是荒漠化的一种表现形式。砾化土地则是土地表层分布有砾石的土地，即已经砾化了的土地[4-5]。

土地砾化程度可以用不同的指标来衡量，如地表砾石覆盖度（surface gravel coverage，G_c）、砾石质量含量（gravel mass content，G_{mc}）、单位面积地表砾石质量（surface gravel mass per unit area，G_m）、单位面积地表砾石体积和单位面积地表砾石数量等。本研究中主要探讨的指标为G_c、G_{mc}和G_m。G_c是指砾石垂直于地面的投影面积占地面总面积的比例；G_{mc}是指土壤样品中砾石质量和土壤总质量的比值[6]，G_{mc}(0~5 cm)、G_{mc}(5~10 cm)则分别代表0~5 cm、5~10 cm深度土层的G_{mc}；G_m是指覆盖在单位面积内土地表面的砾石质量。G_c可以用测量盘法、背景色照片测量法[5]、视点框架法[7]、米格纸投影法[8]、图像法[9-10]等进行测定，G_{mc}可以用筛重法进行测定，G_m可以用高精度的电子天平直接测定，三者中前两者在前人的研究中均已有所涉及，而G_m还鲜见使用。

目前，专家学者关于砾化土地的研究主要集中于戈壁这种特殊的砾化土地类型，如有对戈壁纵剖面沉积物粒度特征的研究[11]，有对戈壁沉积物分形空间变异性的研究[12]，有对戈壁表面砾石粒径的研究[13]，有对戈壁风沙运移规律的研究[14-15]，而对包括戈壁在内的各类型砾化土地的研究还很少见。

阿拉善高原作为国家“北方防沙带”的重点区域，仍长期面临着土地荒漠化的生态退化问题[16-18]。

收稿日期：2022-11-21； **修订日期**：2023-02-16
基金项目：内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0392，2020GG0092)；内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03028)
作者简介：温文杰(1995-)，女，硕士，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: wenwenjie19950216@163.com
通讯作者：裴浩. E-mail: peihao5217@sohu.com

阿拉善高原上除了沙漠、绿洲、河流和湖泊等不被砾石所覆盖的区域以外，存在着大面积土地砾化的地区，这些地区通常自然环境恶劣且脆弱，交通条件不便，人烟稀少[19-21]，限制了学者们对其进行研究，所以目前针对阿拉善高原土地砾化特征的研究基础还相对比较薄弱。本研究以阿拉善高原土地砾化地区为研究区域，研究其G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)的特征及其相关关系，筛选适合不同土地砾化状况的监测指标，明确不同监测指标的适用情景，有利于进一步认识阿拉善高原的土地砾化特征，同时为更大范围的砾化土地的监测与评估奠定指标基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

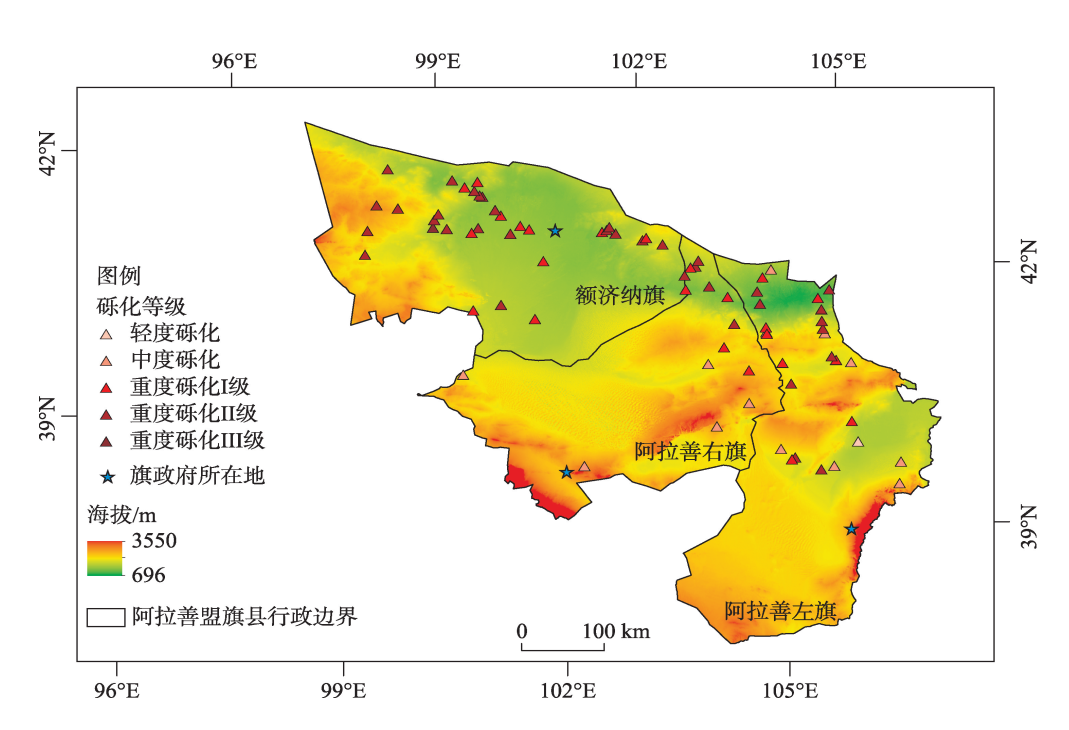
研究区位于内蒙古自治区阿拉善高原，地处37°24′~42°47′N，97°10′~106°53′E（图1），总面积约为25×10^4 km^2[22]。四季明显，昼夜温差较大，干旱少雨，蒸发强烈，风力强劲，年均温度为2.1~9.6 ℃，属于大陆性气候，年降水量为29~296 mm[22-23]。主要地貌类型有戈壁、沙漠、绿洲、山地、丘陵、河流和湖泊等。土地砾化地区内主要的植物群落类型有白刺（*Nitraria tangutorum*）、红砂（*Reaumuria soongorica*）、泡泡刺（*Nitraria sphaerocarpa*）、珍珠猪毛菜（*Salsola passerina*）、绵刺（*Potaninia mongolica*）、梭梭（*Haloxylon ammodendron*）、霸王（*Zygophyllum xanthoxylon*）、膜果麻黄（*Ephedra przewalskii*）和骆驼蓬（*Peganum harmala*）等建群的植物群落[24-26]。

1.2 野外样品采集

砾石样品采集于2021年和2022年的5月。在阿拉善高原，共对75个发生土地砾化的样地（40 m×40 m）进行了砾石样品的采集。样地的选择基于以下原则：主要考虑到样地的代表性，根据地形地貌，同时兼顾不同的主要植被类型，分别在山地、丘陵、高原和盆地的不同土地砾化程度的典型地段设置样地，且不同样地间相隔适当的距离（至少相距20 km，考虑到样地的覆盖面和工作量）。具体的采集方法为在每一个样地中，在其砾石覆盖平均状态处设置3~5个面积为50 cm×50 cm的样方（图2），并将样方中覆盖在地表的砾石全部收集到塑封袋中标记保存。在样方旁边约20 cm处，挖取1个10 cm深的土壤剖面，并分别取其0~5 cm和5~10 cm深度土层的土样约500 g，于塑封袋中标记保存。

1.3 室内样品处理

在实验室内，用32 mm、16 mm、8 mm、4 mm和2



注：底图采用内蒙古自治区测绘地理信息局标准地图制作，审图号为蒙S(2019)33号，对底图边界无修改。

图1 研究区范围及样地分布示意图

Fig. 1 Study area scope and sample sites distribution diagram



图2　样方示意图

Fig. 2　Diagram of quadrats



图3　测量盘示意图

Fig. 3　Diagram of measuring plate

mm的土壤筛从上至下嵌套筛得不同粒径的砾石。针对地表砾石，将砾石尽量紧密且互相不遮盖地平铺于测量盘（图3）中，根据测量盘长和宽的读数即可求得不同粒径的砾石面积，不同粒径的砾石面积和样方面积（50 cm×50 cm）的比值即为不同粒径的G_c，将不同粒径的G_c求和，即得总的G_c；用精度为0.01 g的电子天平称量不同粒径的砾石，即得不同粒径的G_m，将不同粒径的G_m求和，即得总的G_m。针对0~5 cm和5~10 cm土层深度的砾石，用精度为0.01 g的电子天平称量不同粒径的砾石，即得不同粒径的砾石质量，不同粒径的砾石质量与土壤样品的总质量之比即为不同粒径的G_{mc}，将不同粒径的G_{mc}求和，即得总的G_{mc}。

1.4 数据处理与分析

本研究所获取的DEM数据来自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn，30 m×30 m），图1中各样地砾化等级的划分以苗百岭等[5]的研究为标准。利用SPSS 25软件进行单因素方差分析比较不同粒径的G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)的差异显著性，并利用Duncan法进行多重比较。用变异系数（coefficient of variation，C_v）衡量各指标的数据波动情况，C_v越大，数据波动越剧烈。计算公式为：

$$C_v = \sigma/\mu$$

式中：σ为标准差；μ为算数平均值。

利用Origin 2018软件结合R语言软件对总的G_m和G_c随经度和纬度的变化进行一元线性回归并制图，对不同粒径（总）的G_m和G_c之间进行一元线性回归并制图，对总的G_c、G_m与总的G_{mc}(0~5 cm)之间进行一元线性回归并制图。利用SPSS 25软件的Spearman相关性分析功能探讨不同粒径（总）的G_c、G_m与G_{mc}(0~5 cm)、G_{mc}(5~10 cm)之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 阿拉善高原各样地砾石粒径组成和空间分布特征

2.1.1 *砾石粒径组成*　由表1可以看出，阿拉善高原各样地总的G_c的平均值（变化范围）为39.49%（2.34%~83.57%）；总的G_m的平均值（变化范围）为3544.04 g·m^{-2}（146.56~10488.56 g·m^{-2}）；0~5 cm土层内总的G_{mc}的平均值（变化范围）为16.69%（2.48%~53.78%），5~10 cm土层内总的G_{mc}的平均值（变化范围）为14.04%（0.82%~67.81%）；0~5 cm土层内总的G_{mc}的平均值要高于5~10 cm土层内总的G_{mc}的平均值。

表1　阿拉善高原各样地总的G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)的统计学特征

Tab. 1　Statistical characteristics of total G_c, G_m, G_{mc} (0−5 cm) and G_{mc} (5−10 cm) for each site on the Alxa Plateau

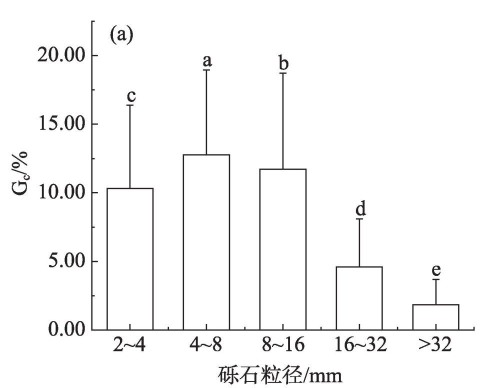
项目	总的G_c/%	总的G_m/(g·m^{-2})	总的G_{mc}(0~5 cm)/%	总的G_{mc}(5~10 cm)/%
AM±SD	39.49±14.84	3544.04±1737.18	16.69±8.08	14.04±10.58
Max	83.57	10488.56	53.78	67.81
Min	2.34	146.56	2.48	0.82

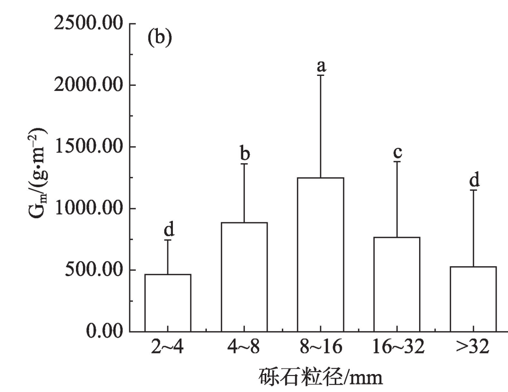
注：AM±SD为算数平均值±标准差；Max为最大值；Min为最小值。

G_c在不同粒径之间存在显著性差异(P<0.05)(图4a),粒径为4~8 mm和8~16 mm的G_c要显著高于其他粒径的G_c;G_m在不同粒径之间存在显著性差异(P<0.05)(图4b),粒径为8~16 mm和4~8 mm的G_m要显著高于其他粒径的G_m。图5为地表砾石的粒径级配曲线,曲线在>4 mm~>8 mm和>8 mm~>16 mm的区间内,斜率较大。以上均说明对于表层土壤砾石而言,粒径为4~8 mm和8~16 mm的砾石占比最大。

G_{mc}(0~5 cm)在不同粒径之间存在显著性差异(P<0.05)(图6),粒径>32 mm和2~4 mm的G_{mc}(0~5 cm)分别为最高和次高;G_{mc}(5~10 cm)在不同粒径之间也存在显著性差异(P<0.05),粒径>32 mm和2~4 mm的G_{mc}(5~10 cm)分别为最高和次高,在0~5 cm和5~10 cm不同深度的土壤中G_{mc}呈现出相同的规律。粒径为2~4 mm的G_{mc}在不同土层深度之间存在显著性差异(P<0.05),5~10 cm土层内的G_{mc}要显著高于0~5 cm土层内的G_{mc}。其他不同粒径的G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)之间不存在显著性差异(P>0.05)。

由表2可以看出,在不同的粒径中,粒径为4~8 mm的G_c和G_m的变异系数最小,分别为48.44%和54.29%,粒径>32 mm的G_c和G_m的变异系数最大,分别为101.15%和118.61%,粒径为4~8 mm的G_c和G_m最为稳定。粒径为8~16 mm的G_{mc}(0~5 cm)的变异系数最小,为60.99%,粒径为4~8 mm的G_{mc}(0~5 cm)的变异系数最大,为75.00%;粒径为2~4 mm的G_{mc}(5~10 cm)的变异系数最小,为73.40%,粒径为4~8 mm的G_{mc}(5~10 cm)的变异系数最大,为110.38%。各个粒径内G_{mc}(0~5 cm)的变异系数均小于G_{mc}(5~10 cm)





注:不同小写字母表示不同粒径之间存在显著性差异(P<0.05)。下同。

图4　不同粒径的G_c和G_m

Fig. 4　G_c and G_m for different particle sizes

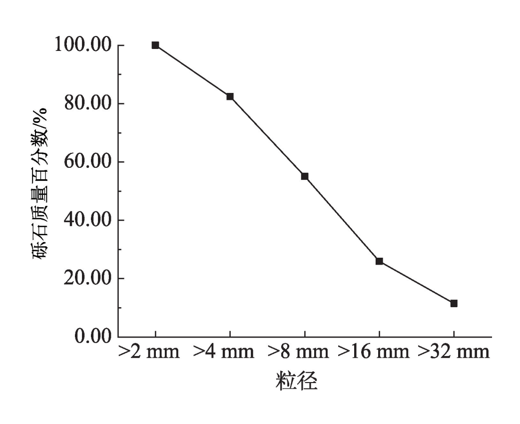
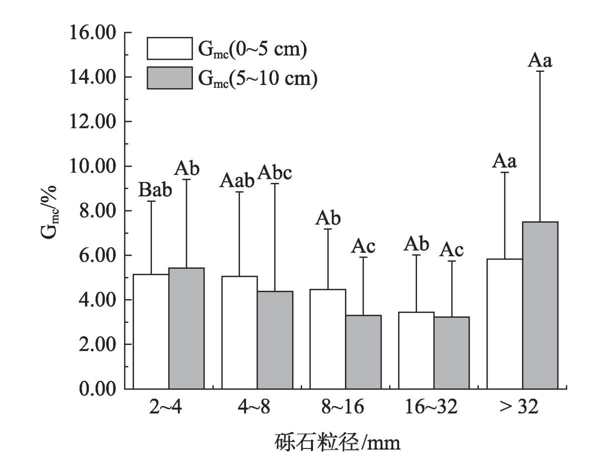


图5　地表砾石的粒径级配曲线

Fig. 5　Gradation distribution curve for land surface gravel



注:不同大写字母表示不同土层深度之间存在显著性差异(P<0.05)。

图6　不同粒径的G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)

Fig. 6　G_{mc} (0−5 cm) and G_{mc} (5−10 cm) for different particle sizes

表2 不同粒径的G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)的变异系数

Tab. 2 Coefficients of variation for G_c, G_m, G_{mc} (0−5 cm) and G_{mc} (5−10 cm) for different particle sizes /%

砾石粒径/mm	C_v			
	G_c	G_m	G_{mc}(0~5 cm)	G_{mc}(5~10 cm)
2~4	58.80	59.95	64.36	73.40
4~8	48.44	54.29	75.00	110.38
8~16	59.76	66.53	60.99	79.11
16~32	75.79	80.04	74.27	78.16
>32	101.15	118.61	66.80	90.23

的变异系数，各个粒径砾石含量在0~5 cm的土层深度内更为稳定。

2.1.2 *砾石的空间分布特征* 由图7可以看出，在阿拉善高原G_c和G_m呈现出由东向西递增的趋势，表明土地砾化程度也由东向西逐渐增加；G_c和G_m呈现出由南向北递增的趋势，表明土地砾化程度也由南向北逐渐增加。在图1中不同砾化等级的样地在空间上的分布也有一致的规律，即由东向西、由南向北砾化等级逐渐加重。这样的空间分布规律可能与阿拉善高原不同区域的风速、降水和气温等气候要素有关。通常情况下，气候越是干旱多风，砾化土地面积越大，砾化程度越重。同时，根据阿拉善高原砾化土地所处的地形地貌，可以分为砾化山地、砾化丘陵、砾化高原和砾化盆地等类型。经过实地观察和对取样的筛分发现，砾化山地的砾石一般粒径很大，基本没有磨圆或抛光，棱角尖锐分明，主要是由于山体基岩分化崩解，山峰崩塌或含有砾石的土壤中的细粒物质在水力和风力等的作用下流失而形成；砾化丘陵的砾石粒径相对较小，棱角处有一定的打磨，主要是由于丘陵顶部基岩风化崩解或含有砾石的土壤中的细粒物质在水力和风力等的作用下流失而形成；砾化高原的砾石一般粒径较小，表面光滑，棱角相对圆钝，主要是由于含有砾石的土壤中的细粒物质在水力和风力等的作用下流失而形成；砾化盆地的砾石一般粒径较小，表面相对光滑，棱角相对圆钝，主要由周围的高山或高原上的砾石在重力、水力和风力等的作用下经搬运堆积或含有砾石的土壤中的细粒物质在水力和风

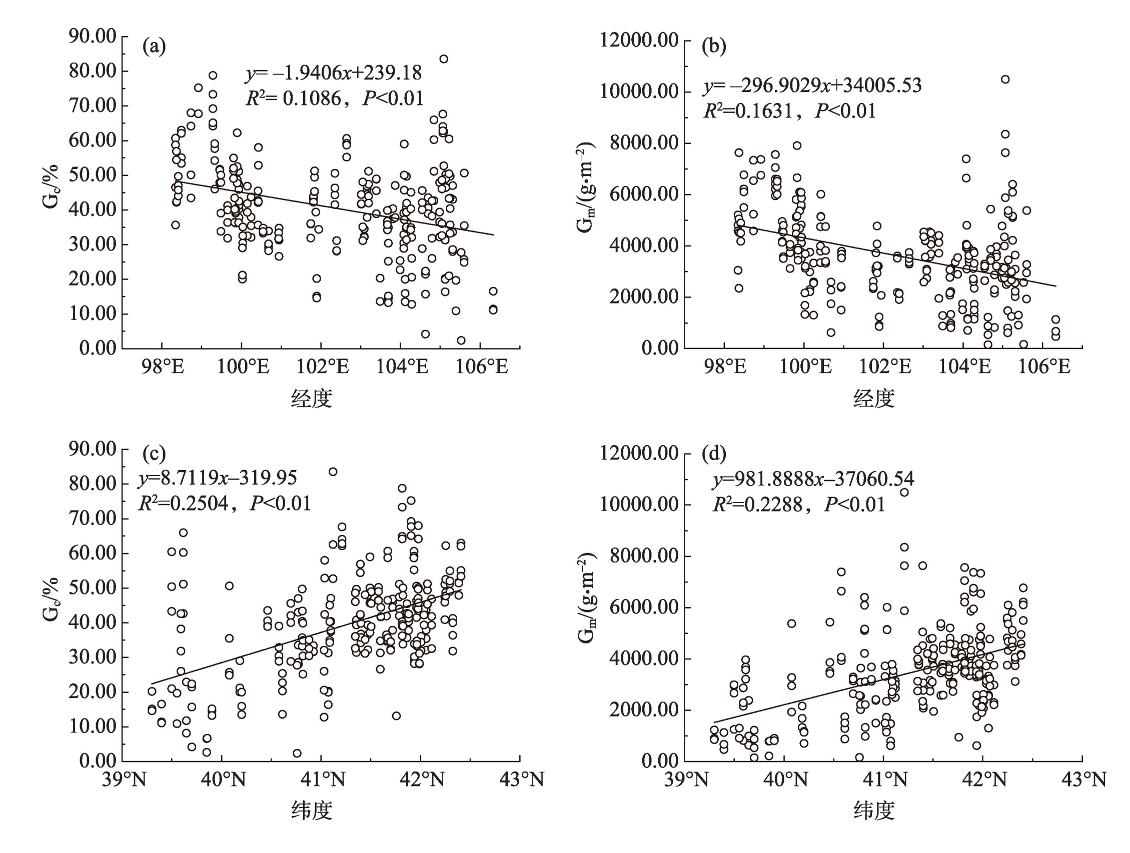


图7 阿拉善高原各样地总的G_c和G_m沿东西、南北方向的空间分布特征

Fig. 7 The spatial distribution characteristics of total G_c and G_m along east-west and south-north directions for each sites on the Alxa Plateau

力等的作用下流失而形成。

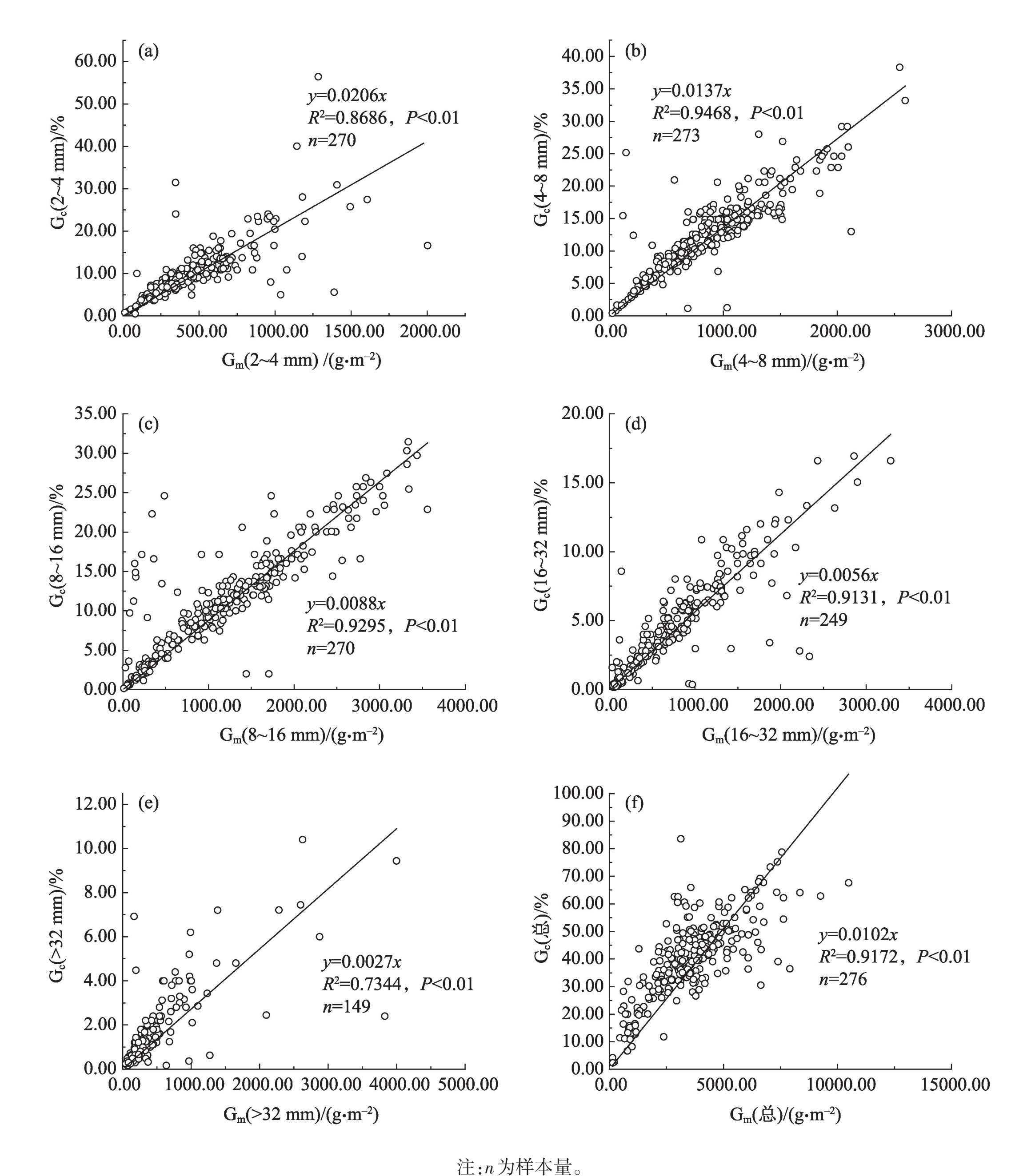
2.2 G_m和G_c之间的相关性及各样地的土地砾化程度

由图8可以看出,不同粒径(总)的G_m和G_c均呈极显著的一元线性回归关系(P<0.01)。按照苗百岭等[5]对地表砾石覆盖度的土地砾化程度划分标准,并结合图8f,得到不同土地砾化程度下,G_c(总)所对应的G_m(总)(表3);得到阿拉善高原75个样地各自的土地砾化程度,其中属于重度砾化Ⅱ级的样地数量最多,高达36个。

2.3 G_c、G_m分别和G_{mc}(0~5 cm)、G_{mc}(5~10 cm)之间的相关性

表4和表5分别为不同粒径(总)的G_c、G_m与G_{mc}(0~5 cm)之间的Spearman相关性分析,可以看出,除了>32 mm的粒径以外,相同粒径的G_c与G_{mc}(0~5 cm)、G_m与G_{mc}(0~5 cm)均呈极显著正相关关系(P<0.01),总的G_c与总的G_{mc}(0~5 cm)、总的G_m与总的G_{mc}(0~5 cm)均呈极显著正相关关系(P<0.01)。

将总的G_c、G_m与总的G_{mc}(0~5 cm)进行一元线性回归(图9),得到的方程均有P<0.01,说明越高的



注:n为样本量。

图8 不同粒径(总)的G_m与G_c之间的一元线性回归

Fig. 8 Univariate linear regression between G_m and G_c for different particle sizes (total)

表3 不同土地砾化程度下G_c(总)所对应的G_m(总)

Tab. 3 G_m(total) corresponding to G_c(total) at different levels of land graveling

土地砾化程度	G_c(总)/%	G_m(总)/(g·m^{-2})
轻度砾化	2< G_c(总)≤10	196< G_m(总)≤980
中度砾化	10 < G_c(总)≤25	980< G_m(总)≤2451
重度砾化Ⅰ级	25 < G_c(总)≤40	2451 < G_m(总)≤3922
重度砾化Ⅱ级	40 < G_c(总)≤70	3922 < G_m(总)≤6863
重度砾化Ⅲ级	G_c(总)>70	G_m(总)>6863

G_c、G_m则表征出0~5 cm土层内有越高的G_{mc}，它们之间具有良好的相关性，表明G_{mc}(0~5 cm)也可以作为土地砾化程度的一个辅助的监测指标。

表6和表7分别为不同粒径(总)的G_c、G_m与G_{mc}(5~10 cm)之间的Spearman相关性分析，可以看出，对于相同粒径的G_c、G_m和G_{mc}(5~10 cm)，仅有2~4 mm的G_c与G_{mc}(5~10 cm)，G_m与G_{mc}(5~10 cm)呈极显著正相关关系(P<0.01)。2~4 mm的G_c、G_m与总的G_{mc}(5~

表4 不同粒径(总)的G_c和G_{mc}(0~5 cm)之间的Spearman相关性分析

Tab. 4 Spearman correlation analysis between G_c and G_{mc} (0−5 cm) for different particle sizes (total)

	砾石粒径/mm	G_c					
		2~4	4~8	8~16	16~32	>32	总
G_{mc} (0~5 cm)	2~4	0.337**	−0.008	−0.441	−0.385**	−0.219**	−0.246**
	4~8	0.065	0.356**	0.083	−0.147*	−0.207*	0.179**
	8~16	−0.325**	0.084	0.546**	0.383**	0.006	0.285**
	16~32	−0.232**	−0.266**	0.085	0.282**	0.288**	−0.031
	>32	−0.414	0.000	−0.143	−0.110	0.061	−0.284
	总	−0.099	0.143*	0.223**	0.128*	−0.055	0.187**

注：*表示P<0.05水平显著；**表示P<0.01水平极显著。下同。

表5 不同粒径(总)的G_m和G_{mc}(0~5 cm)之间的Spearman相关性分析

Tab. 5 Spearman correlation analysis between G_m and G_{mc} (0−5 cm) for different particle sizes (total)

	砾石粒径/mm	G_m					
		2~4	4~8	8~16	16~32	>32	总
G_{mc} (0~5 cm)	2~4	0.354**	−0.091	−0.439**	−0.374**	−0.193*	−0.426**
	4~8	0.093	0.394**	0.033	0.131*	−0.174*	0.036
	8~16	−0.322**	0.179**	0.472**	0.378**	0.066	0.452**
	16~32	−0.226**	−0.213*	0.080	0.292**	0.290**	0.185*
	>32	−0.470*	−0.177	−0.223	0.100	0.187	0.018
	总	−0.090	0.170**	0.180**	0.150*	−0.020	0.226**

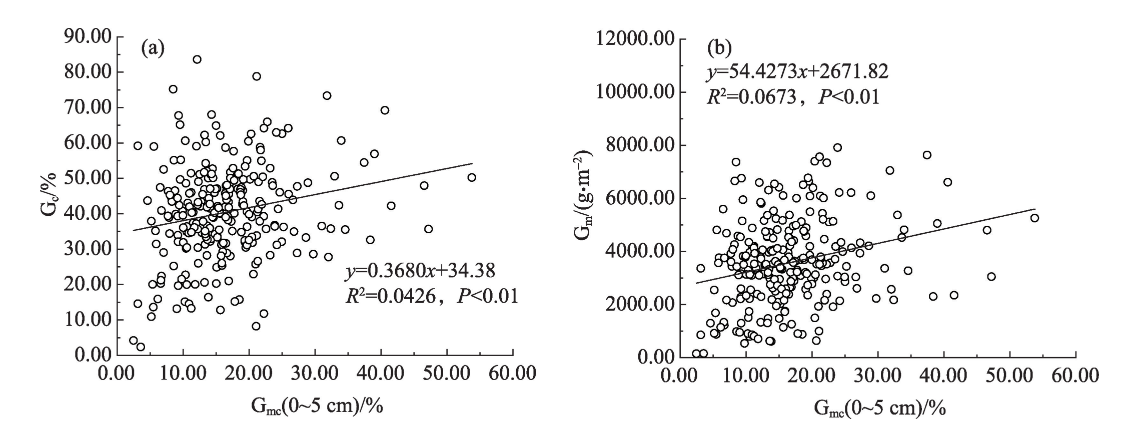


图9 总的G_{mc}(0~5 cm)和总的G_c、G_m之间的一元线性回归

Fig. 9 Univariate linear regression between total G_{mc} (0−5 cm) and total G_c, G_m

表6 不同粒径(总)的G_c和G_{mc}(5~10 cm)之间的Spearman相关性分析

Tab. 6 Spearman correlation analysis between G_c and G_{mc} (5−10 cm) for different partical sizes (total)

	砾石粒径/mm	G_c					
		2~4	4~8	8~16	16~32	>32	总
G_{mc} (5~10 cm)	2~4	0.301**	−0.042	−0.273**	−0.180**	−0.130	−0.096
	4~8	0.117	0.072	−0.042	−0.081	−0.211*	0.051
	8~16	−0.079	−0.059	0.117	0.132	−0.105	0.070
	16~32	0.015	−0.295**	−0.304**	−0.011	0.060	−0.287**
	>32	−0.130	−0.413	−0.360	0.064	0.050	−0.436
	总	0.128*	0.022	−0.075	−0.037	−0.120	0.019

表7 不同粒径(总)的G_m和G_{mc}(5~10 cm)之间的Spearman相关性分析

Tab. 7 Spearman correlation analysis between G_m and G_{mc} (5−10 cm) for different particle sizes (total)

	砾石粒径/mm	G_m					
		2~4	4~8	8~16	16~32	>32	总
G_{mc} (5~10 cm)	2~4	0.283**	−0.100	−0.239**	−0.217**	−0.098	−0.236**
	4~8	0.103	0.035	−0.043	−0.106	−0.187*	−0.072
	8~16	0.013	−0.057	0.129	0.095	−0.108	0.108
	16~32	−0.105	−0.346**	−0.344**	0.021	−0.059	−0.177
	>32	−0.088	−0.522*	−0.343	0.015	0.018	−0.328
	总	0.139*	−0.034	−0.074	−0.089	−0.127	−0.052

10 cm)呈显著正相关关系(P<0.05),说明2~4 mm的G_c和G_m可以成为2~4 mm的G_{mc}(5~10 cm)和总的G_{mc}(5~10 cm)的一个指示标志,2~4 mm的G_c和G_m越大,则2~4 mm的G_{mc}(5~10 cm)和总的G_{mc}(5~10 cm)也越大。

3 讨 论

不同的学者对戈壁的概念都曾进行过详细的科学界定,但并未对戈壁的砾石覆盖度有过详细的划分。通过对各样地地表砾石覆盖度分布区间的分析,本研究发现,戈壁不同部位的砾石覆盖度均高于25%,结合冯益明等[27−29]、钱广强等[30]、苗百岭等[5]和申元村等[31]的研究,在本研究中认为,戈壁是一种特殊的砾化土地类型。当满足了气候区、动力条件、地貌特征、地表物质组成、植被、土壤和水分诸多限制条件之后,且砾石覆盖度达到25%,即重度砾化Ⅰ级的临界值时[5],砾化的土地便被称为戈壁。

本研究中阿拉善高原各样地总的G_c的平均值为39.49%,且在所有的样地中,属于重度砾化Ⅱ级的样地数量最多,高达36个,反映出该区域土地砾化程度较重。土地砾化程度越重,地表砾石覆盖度越大,而砾石层可以保护下层土壤,降低水力和风力等对细粒物质的侵蚀,改变地面光谱反射特征、温度变幅与变率和减少水分蒸发等。当土壤中的细粒物质的流失逐渐减少,砾化过程逐渐停滞,土地砾化程度到达相对最重的阶段,地表也将达到一个相对稳定的状态。对于G_c和G_m而言,粒径为4~8 mm和8~16 mm的砾石占比要显著高于其他粒径的占比,这主要是由于阿拉善高原昼夜温差较大,风化作用强烈,更易形成大量小粒径的砾石[32−33]。从空间分布特征来看,阿拉善高原各样地总的G_c和G_m呈现出由东向西逐渐增大,由南向北逐渐增大的分布规律,砾化土地呈现出由东向西、由南向北逐渐增多的分布格局。这与气候的干燥度从东向西、从南向北越来越大有关。

在本研究中,分别针对各粒径和总的G_m、G_c,拟合了一元线性回归方程,由于样本数量较大(149~276),且P<0.01,所以方程具有一定的代表性。针对阿拉善高原而言,在野外的测量工作中,G_m相比于G_c而言,更容易测量、用时更短、精度更高。当不具备测量G_c的条件时,可以用电子天平测量不同粒径或总的G_m之后,代入本研究中的方程,得到相应

的G_c，此时的G_c也可客观的反映砾石真实的覆盖度。拓展到内蒙古其他地区，G_m和G_c是否也存在显著的一元线性回归关系？这将是我们后续工作的研究重点。且在实际应用中，G_c适用于地表仅有一层砾石的砾化土地的监测评估，当砾石有两层或多于两层时，该指标容易饱和，不能很好地反映土地砾化程度。G_m既适用于地表仅有一层砾石的地段的监测评估，也适用于地表有两层或多于两层砾石的地段的监测评估。继续探索新的监测指标如土地不同层深单位体积土壤中砾石质量等，以提高土地砾化监测的准确性和全面性，也是我们后续研究的重要任务。

除2~4 mm和>32 mm的粒径外，各粒径和总的G_c、G_m与0~5 cm土层内G_{mc}的相关性要明显大于与5~10 cm土层内G_{mc}的相关性，这与母质的物理化学性质、土壤的侵蚀-沉积机制、气温降水等诸多因素有关[34]。>32 mm的G_c、G_m与G_{mc}（0~5 cm）、G_{mc}（5~10 cm）均无显著相关关系（$P>0.05$），这主要是由于地表强烈的风化作用，大粒径的砾石被剥蚀、磨圆，导致大粒径的砾石含量明显减少。

4 结 论

本研究探讨阿拉善高原土地砾化地区的G_c、G_m、G_{mc}(0~5 cm)和G_{mc}(5~10 cm)的特征及其相关关系，结果表明：

（1）阿拉善高原各样地总的G_c的平均值为39.49%。且在所有的监测样地中，属于重度砾化Ⅱ级的监测样地数量最多，高达36个。在空间分布格局上呈现出G_c和G_m由东向西、由南向北逐渐增大的分布规律，应高度关注阿拉善高原的荒漠化防治工作。

（2）由于强烈的风化作用对地表大粒径的砾石进行了剥蚀、磨圆，导致其含量明显减少，使得>32 mm的G_c、G_m与G_{mc}(0~5 cm)、G_{mc}(5~10 cm)均无显著相关关系（$P>0.05$），而4~8 mm和8~16 mm的G_c、G_m在各粒径中占比最高，且粒径为4~8 mm的G_c、G_m的变异系数最小，最为稳定。

（3）本研究中首次提出了G_m作为土地砾化程度的监测指标。不同粒径和总的G_m和G_c均呈极显著的一元线性回归关系（$P<0.01$）。在实际的测量工作中，G_m比G_c更容易测量、用时更短、精度更高，所以在不具备测量G_c的条件下，可以选择测量G_m来进行土地砾化状况的监测。

（4）总的G_c与总的G_{mc}(0~5 cm)、总的G_m与总的G_{mc}(0~5 cm)均呈极显著正相关关系（$P<0.01$），G_{mc}(0~5 cm)也可以作为土地砾化程度的一个辅助的监测指标。

参考文献（References）：

[1] 黄佳轮, 安凯旋, 陈汉林, 等. 野外砾石统计方法的应用与对比[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(5): 601–614. [Huang Jialun, An Kaixuan, Chen Hanlin, et al. Application and comparison of field gravel statistical methods[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2020, 47(5): 601–614.]

[2] Liu X N, Fan D X, Yu X X, et al. Effects of simulated gravel on hydraulic characteristics of overland flow under varying flow discharges, slope gradients and gravel coverage degrees[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19781.

[3] 马晨雷, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 150–155, 161. [Ma Chenlei, Dai Cuiting, Liu Yaojun, et al. Effects of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 150–155, 161.]

[4] 裴浩, 吴昊, 关彦如, 等. 土地沙化定义及其与沙被、草原退化、荒漠化关系的探讨[J]. 内蒙古气象, 2022(1): 16–23. [Pei Hao, Wu Hao, Guan Yanru, et al. Definition of land sandification and its relationship with desertification, grassland degradation and desertification[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2022(1): 16–23.]

[5] 苗百岭, 裴浩, 贾成朕, 等. 砾化土地类型、监测指标及生态治理对策[J]. 内蒙古气象, 2021(6): 37–43. [Miao Bailing, Pei Hao, Jia Chengzhen, et al. Classification, monitoring indicators and ecologically-based management of gravelization land[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2021(6): 37–43.]

[6] 吕刚, 王婷, 王韫策, 等. 辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 86–92. [Lü Gang, Wang Ting, Wang Yunce, et al. Effect of gravel content and particle size on soil infiltration in low mountainous upland region of western Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 86–92.]

[7] 高杨, 符素华, 罗来军, 等. 砾石覆盖度测量方法研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 264–267, 270. [Gao Yang, Fu Suhua, Luo Laijun, et al. A study on measurement methods of rock fragment cover[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 264–267, 270.]

[8] 张克存, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石盖度戈壁床面动力学特征研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1077–1082. [Zhang Kecun, Zhang Weimin, Qu Jianjun, et al. Study on dynamic properties of

gobi surface with different gravel coverage[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1077-1082.]

[9] Mu Y, Wang F, Zheng B Y, et al. McGET: A rapid image-based method to determine the morphological characteristics of gravels on the gobi desert surface[J]. Geomorphology, 2018, 304: 89-98.

[10] 高君亮, 高永, 吴波, 等. 戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 135-141. [Gao Junliang, Gao Yong, Wu Bo, et al. Spatial heterogeneity of topsoil particles in Jartai Gobi, Inner Mongolia[J]. Soils, 2019, 51(1): 135-141.]

[11] 肖靖安, 裴亮, 孙莉英, 等. 额济纳旗两种地貌类型戈壁纵剖面沉积物粒度特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 38-44, 52. [Xiao Jingan, Pei Liang, Sun Liying, et al. Characteristics of grain sizes of sediments in two typical regions of Ejina Gobi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 38-44, 52.]

[12] 刘茜雅, 王海兵, 左合君, 等. 苏宏图戈壁沉积物分形空间变异性及其成因[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 168-177. [Liu Xiya, Wang Haibing, Zuo Hejun, et al. Fractal spatial variability and its genesis of sediments in Suhongtu Gobi[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 168-177.]

[13] 曹晓阳, 穆悦, 曹晓明, 等. 基于高光谱数据的戈壁地表砾石粒径反演研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 397-404. [Cao Xiaoyang, Mu Yue, Cao Xiaoming, et al. Grain size retrieving of gobi surface based on hyperspectral data[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 397-404.]

[14] Tan L H, Zhang W M, Qu J J, et al. Aeolian sand transport over gobi with different gravel coverages under limited sand supply: A mobile wind tunnel investigation[J]. Aeolian Research, 2013, 11: 67-74.

[15] Wang T, Qu J J, Tan L H, et al. Aeolian sediment transport over the Gobi with high gravel coverage under extremely strong winds in the hundred miles windy area along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220: 104857.

[16] 李达净, 许端阳, 丁雪, 等. 1981—2010年中国北方风蚀气候侵蚀力演变与植被动态响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 15-20. [Li Dajing, Xu Duanyang, Ding Xue, et al. Changes of wind erosion climatic erosivity and vegetation dynamics response in northern China from 1981 to 2010[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 15-20.]

[17] 何磊, 马文瑛, 赵传燕. 人类活动和自然因素在阿拉善盟荒漠化过程中的相对作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(3): 344-350. [He Lei, Ma Wenying, Zhao Chuanyan. Relative roles of human activities and natural elements in the desertification process in Alxa League[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2015, 51(3): 344-350.]

[18] Yang Y Y, Qu Z Q, Shi P J, et al. Wind regime and sand transport in the corridor between the Badain Jaran and Tengger Deserts, central Alxa Plateau, China[J]. Aeolian Research, 2014, 12: 143-156.

[19] 万炜, 颜长珍, 肖生春, 等. 1975—2015年阿拉善高原沙漠化过程、格局与驱动机制[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 17-29. [Wan Wei, Yan Changzhen, Xiao Shengchun, et al. Process, spatial pattern and driving mechanisms of the aeolian desertification in the Alxa Plateau from 1975 to 2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 17-29.]

[20] 万炜, 颜长珍. 阿拉善高原生态环境退化研究进展[J]. 地球环境学报, 2018, 9(2): 109-122. [Wan Wei, Yan Changzhen. Research progress of eco-environmental degradation in Alxa Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(2): 109-122.]

[21] 肖生春, 颜长珍, 田永祯, 等. 阿拉善高原沙漠化土地防治区划与治理对策[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 182-192. [Xiao Shengchun, Yan Changzhen, Tian Yongzhen, et al. Regionalization for desertification control and countermeasures in the Alxa Plateau, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 182-192.]

[22] 王健铭, 崔盼杰, 钟悦鸣, 等. 阿拉善高原植物区域物种丰富度格局及其环境解释[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 14-23. [Wang Jianming, Cui Panjie, Zhong Yueming, et al. Biogeographic patterns and environmental interpretation of plant regional species richness in Alxa Plateau of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 14-23.]

[23] 闫瑞亚, 娄安如, 谢苏阳, 等. 阿拉善高原荒漠植物生活型组成及其与水热因子的相关性[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 349-355. [Yan Ruiya, Lou Anru, Xie Suyang, et al. The composition and distribution pattern of plant life forms in Alxa Plateau[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2019, 55(3): 349-355.]

[24] 闫瑞亚, 娄安如. 阿拉善荒漠灌丛群落谱系结构及其影响因子[J]. 西北植物学报, 2019, 39(11): 2072-2081. [Yan Ruiya, Lou Anru. Phylogenetic structure of shrub community in Alxa desert and its environmental determinants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(11): 2072-2081.]

[25] 马雄忠, 王新平. 阿拉善高原2种荒漠植物根系构型及生态适应性特征[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6001-6008. [Ma Xiongzhong, Wang Xinping. Root architecture and adaptive strategy of two desert plants in the Alxa Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6001-6008.]

[26] 曲梦君, 努尔依拉·阿巴拜克, 邹旭阁, 等. 地理距离和环境因子对阿拉善戈壁植物群落β多样性的影响[J]. 生物多样性, 2022, 30(11): 109-118. [Qu Mengjun, Nueryila Ababaike, Zou Xuge, et al. Influence of geographic distance and environmental factors on beta diversity of plants in the Alxa Gobi region in northern China [J]. Biodiversity Science, 2022, 30(11): 109-118.]

[27] 冯益明, 吴波, 周娜, 等. 基于遥感影像识别的戈壁分类体系研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 635-641. [Feng Yiming, Wu Bo, Zhou Na, et al. Gobi classification system based on remote sensing image recognition[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 635-641.]

[28] 冯益明, 智长贵, 姚爱冬. 基于决策树的戈壁信息提取研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 125-130. [Feng Yiming, Zhi Changgui, Yao Aidong. Gobi information extraction based on decision tree classification method[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 125-

130.]

[29] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 391−398. [Feng Yiming, Wu Bo, Yao Aidong, et al. A study on classification system and inventory of gobi[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 391−398.]

[30] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 625−633. [Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Gravel morphometric analysis based on digital images of different gobi surfaces in northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34 (3): 625−633.]

[31] 申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(1): 57−66. [Shen Yuancun, Wang Xiuhong, Cheng Weiming, et al. Integrated physical regionalization of stony deserts in China[J]. Progress in Geography, 2016, 35(1): 57−66.]

[32] Shen Y P, Zhang C L, Wang X S, et al. Statistical characteristics of wind erosion events in the erosion area of northern China[J]. Catena, 2018, 167: 399−410.

[33] 章志鑫, 陈同德, 王颢霖, 等. 拉萨河流域不同植被类型坡面砾石形态与分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 256−263. [Zhang Zhixin, Chen Tongde, Wang Haolin, et al. Morphology and distribution characteristics of gravel on slopes of different vegetation types in Lhasa River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 256−263.]

[34] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 三峡库区紫色土的碎石分布特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 293−302. [Wang Xiaoyan, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. Spatial distribution of rock fragments in purple soil in three gorges reservoir area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 293−302.]

Land graveling characteristics and monitoring indicators of the Alxa Plateau

WEN Wenjie[1,2], PEI Hao[1,3], BA Gen[1,4], WU Yongjun[1,5], LIU Zhiming[1,6]

(1. Inner Mongolia Desert Ecological Meteorological Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 4. Alxa League Meteorological Bureau, Alxa League 750306, Inner Mongolia, China; 5. Dongwuzhumuqin Banner Meteorological Bureau, Xilin Gol 026300, Inner Mongolia, China; 6. Siziwang Banner Meteorological Bureau, Ulanqab 011899, Inner Mongolia, China)

Abstract: Foundation data from which to develop indicators to monitor and evaluate the graveling land of the Alxa Plateau is required. To address this, the characteristics of surface gravel coverage (G_c), surface gravel mass per unit area (G_m), gravel mass content in the 0−5 and 5−10 cm soil depths [G_{mc} (0−5 cm), G_{mc} (5−10 cm)], and their relationships in the land graveling areas of the Alxa Plateau were assessed and analyzed using one-way analysis of variance, Duncan multiple comparisons, univariate linear regression, and correlation analysis. The average total G_c was 39.49% and the average total G_m was 3544.04 $g\cdot m^{-2}$. The G_c and G_m values at 4−8 and 8−16 mm were significantly higher when compared with the other particle sizes ($P < 0.05$). The coefficients of variation for G_c and G_m with a particle size of 4−8 mm were the smallest and most stable. The spatial distribution patterns of the G_c and G_m showed gradual increases from east to west and south to north. Different particle sizes (total) of the G_m and G_c showed extremely significant linear regression ($P < 0.01$), G_m could also be a good evaluation of the land graveling level. According to the classification threshold at the graveling level for G_c, the corresponding classification for G_m was determined. Except for the 2−4 mm and > 32 mm particles, the correlations between particle sizes in the G_c, G_m, and G_{mc} in the 0−5 cm soil layer were significantly greater when compared with the 5−10 cm soil layer, and the correlations between total G_c, G_m, and G_{mc} in the 0−5 cm soil layer were significantly greater when compared with the 5−10 cm soil layer. A surface gravel coverage threshold of 25% was determined for the Gobi, which is a graveling land type. The results of this study provide indicator data on which to base the monitoring and assessment of graveling land in the Alxa Plateau and other regions.

Keywords: land graveling; gravel coverage; surface gravel mass per unit area; gravel mass content; Alxa Plateau